网拱形沙障防风固沙效益的风洞模拟

王云正[1]，尚小伟[1]，霍 毅[1]，李欣蓓[1]，刘建国[1]，张 楠[1]，屈建军[2,3]，朱志昊[2]
〔1.中国电力工程顾问集团 西北电力设计院有限公司，陕西 西安 710075；2.西北大学
城市与环境学院，陕西 西安 710127；3.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)，广东 广州 511458〕

摘 要：［目的］对新型可移动式网拱形沙障进行风洞模拟试验，为网拱形沙障的实际应用和发挥更佳防风固沙效益提供理论依据。［方法］对2，3，4，8 mm孔径单双层共8种网拱形沙障进行试验，风速为6，10，14，18 m/s的风洞模拟试验。使用毕托管测量风速，集沙仪获取输沙量，插钎量化蚀积量。通过计算对比沙障的风速加速率、防风效能、风沙流结构和蚀积状态。［结果］孔径2 mm双层网拱形沙障的综合防护性能最优。在防风效果方面，该沙障通过有效分散气流动力，降低障后区域风速；在不同试验风速下，其防风效能均保持在45.2%以上，且变化幅度小于1.6%，表现出优异的稳定性。在输沙率调控方面，当风速为10 m/s时，该沙障固沙率高达99.9%；当风速增至18 m/s时，输沙率在沙障高度以下呈指数下降趋势，在沙障高度以上呈指数上升趋势。在积沙特征方面，孔径4与8 mm的沙障积沙能力较差，积沙厚度在0.3 cm以下。而2 mm孔径沙障效果最佳，最大积沙厚度可达1.4 cm，障后积沙主要集中于10～30 cm范围，且障内积沙分布均匀，有助于稳定沙障结构。［结论］孔径2 mm双层网拱形沙障在降低风速，减少输沙率及增加积沙方面均表现优异，其防风效能和固沙率在不同风速下均保持高效，生产运输施工便捷，推广与应用价值较大。

关键词：网拱形沙障；孔径；单双层；防风固沙效益
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X(2026)05-0125-11 **中图分类号：**S775，S288

文献参数：王云正，尚小伟，霍毅，等.网拱形沙障防风固沙效益的风洞模拟[J].水土保持通报，2026，46(5)：125-135. Wang Yunzheng，Shang Xiaowei，Huo Yi，et al. Wind tunnel simulation of windbreak and sand-fixing benefits of net-arched sand barrier [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46(5)：125-135.
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.020 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.05.020**

Wind tunnel simulation of windbreak and sand-fixing benefits of net-arched sand barrier

Wang Yunzheng[1]，Shang Xiaowei[1]，Huo Yi[1]，Li Xinbei[1]，Liu Jianguo[1]，Zhang Nan[1]，Qu Jianjun[2,3]，Zhu Zhihao[2]
(1.*Northwest Electric Power Design Institute Co.，Ltd. of China Power Engineering Consulting Group，Xi'an，Shaanxi* 710075，*China*；2.*College of Urban and Environmental Sciences，Northwest University，Xi'an，Shaanxi* 710127，*China*；3.*Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory* (*Guangzhou*)，*Guangzhou，Guangdong* 511458，*China*)

Abstract：[Objective] Wind tunnel experiments were conducted on a novel movable net-arched sand barrier in order to provide a theoretical basis for its practical application and the achievement of improved windbreak and sand-fixing benefits. [Methods] Eight types of net-arched sand barriers with single-layer and double-layer structures and aperture sizes of 2，3，4，and 8 mm were tested under wind speeds of 6，10，14，and 18 m/s. A Pitot tube was used to measure wind speed，a sand sampler to obtain sand transport quantity，and insertion rods to quantify erosion and deposition amounts. The wind speed acceleration rate，windbreak efficiency，wind-sand flow structure，and erosion/deposition characteristics of each barrier were calculated and compared. [Results] The double-layer net-arched sand barrier with an aperture size of 2 mm exhibited the best comprehensive protection performance. In terms of windbreak effect，this barrier effectively dissipated airflow momentum and reduced wind

收稿日期：2026-01-29 **修回日期：**2026-04-16 **采用日期：**2026-04-20
资助项目：中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科研项目"沙漠地区光伏建设与生态治理耦合系统研究"(NW-RD037-2023)
第一作者：王云正(1984—)，男(汉族)，陕西省榆林市人，硕士，高级工程师，主要从事光伏治沙、水土保持与环境保护领域方面的研究。Email：wangyunzheng@nwepdi.com。
通信作者：朱志昊(1998—)，男(回族)，宁夏回族自治区石嘴山市人，博士研究生，研究方向为风沙防治工程。Email：1019731487@qq.com。

speed in the leeward area. Under different test wind speeds, its windbreak efficiency consistently remained above 45.2%, with a variation of less than 1.6%, demonstrating excellent stability. Regarding sediment flux density regulation, at a wind speed of 10 m/s, the sand-fixing efficiency of this barrier reached 99.9%. When the wind speed increased to 18 m/s, the vertical sediment flux density distribution followed an exponential decrease below the barrier height and an exponential increase above the barrier height. Concerning sand accumulation characteristics, the barriers with aperture sizes of 4 mm and 8 mm showed poor sand retention, with accumulation thickness below 0.3 cm. In contrast, the 2 mm aperture barrier achieved the best performance, with a maximum accumulation thickness of 1.4 cm. Sand deposition was mainly concentrated within 10—30 cm downwind of the barrier, and the accumulation was uniformly distributed within the barrier, contributing to structural stability. [Conclusion] The double-layer net-arched sand barrier with a 2 mm aperture performs excellently in reducing wind speed, decreasing sediment flux density, and enhancing sand accumulation. Its windbreak efficiency and sand-fixing efficiency remain high under different wind speeds. Convenient for production, transportation, and construction, it holds significant value for promotion and application.

Keywords: net-arched sand barrier; aperture; single or double layer; windbreak and sand-fixing benefits

沙障作为防沙治沙的主要措施,是利用秸秆、砾石以及其他材料,在流沙上设置阻滞风沙流运动和固定沙面的障碍物[1-2],在众多风沙防治工程中得到应用[3]。草方格沙障由苏联彼得洛夫引进中国,并经过中国老一代治沙者试验总结,最终形成1 m×1 m规格[4],在包兰铁路风沙防治中得到应用[5]。尼龙网阻沙栅栏是一种高立式沙障,在莫高窟崖顶防治多风向情景下沙砾质戈壁风沙流危害中获得成功[6]。针对青藏铁路区域沙粒传输高度高的特征,高立式大方格沙障兼顾阻沙和固沙功能,得到成功应用[7]。面对海岸风沙防治原有措施失效的情况,屈建军等[8]创造出有效的尼龙网蜂巢式固沙障,并构建出海岸风沙防护体系。为提升沙障防风固沙效益,减少施工难度与工程成本,众多学者设计出多种新型结构沙障。传统挡沙墙一般是直插式和挂板式。斜插式沙障是兰新铁路沿线采用的一种新型防沙挡土墙,其抗风性能更佳[9]。传统袋状沙障主要起固沙作用,羽翼袋沙障是在传统的沙袋沙障上插入2片挡板而形成的新型结构沙障,增强了对风沙流的阻滞作用[10]。传统草方格使用铁锹将秸秆压进沙地形成V形结构[11],而新型刷状草方格通过机械化生产制成多段刷状网绳,再将其铺设在沙地上,施工更加便捷[12]。为了使网状沙障更好应用于实际,上疏下密式网状沙障通过风洞试验脱颖而出[13],研制出的网盾状可移动式沙障已被应用于沙质岛礁季节性固沙[14]。

面对光伏电站外围风沙侵蚀严重问题,屈建军等[15]发明一种新型提升式可移动的网拱形沙障。小孔径移动式网状沙障展现出更好的固沙效果[14],多层网状沙障蕴含整流原理[16],截留沙粒能力更强。从孔径和层数方面改进可大幅提升网拱形沙障防风固沙效益。因此,本研究通过风洞模拟试验,对比不同类型网拱形沙障的风速加速率、防风效能、输沙率分布和积沙状态,评估其防风固沙效益,旨在为网拱形沙障的设计和应用提供科学依据,也可为风沙防治工程提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

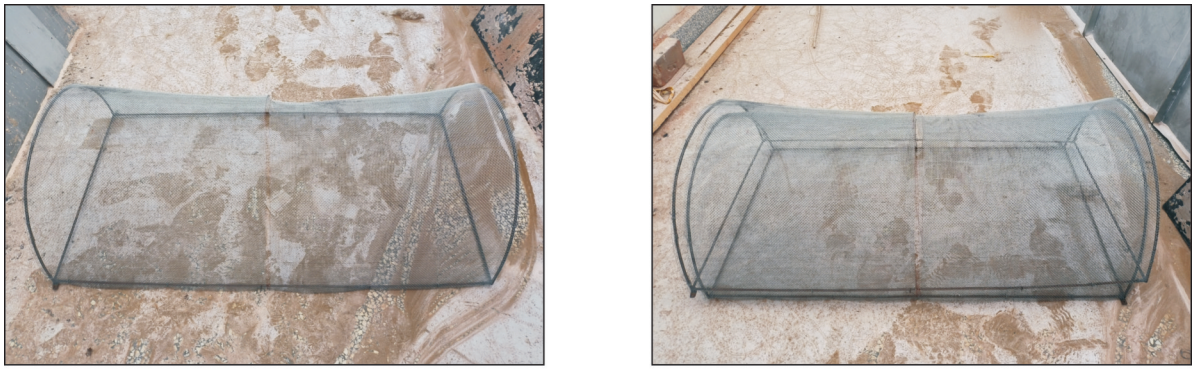
风洞模拟试验于2024年7月在中国科学院西北生态环境与资源研究院沙坡头野外风洞实验室进行。试验段横截面1.2 m×1.2 m,长度21 m,边界层最大厚度为0.5 m,配有风速测量仪风速控制平台、多通道防沙风速风压自动采集系统、台式计算机和秒表等专业设备[17]。

试验材料为拱形金属网,为更接近实际情况,根据相似性原理,沙障采取1∶1的相似比,规格分别为孔径2,3,4,8 mm的拱形金属网单层(图1a)和双层(图1b),沙障侧面接近半圆形,沙障长1.2 m,宽0.6 m,高0.3 m。为了研究网拱形沙障对输沙率、蚀积变化的影响,使用粒径小于等于0.2 mm沙粒布设成厚度0.1 m沙床。

1.2 数据收集分析

在试验中,设置4组风速条件(6,10,14,18 m/s),使用皮托管对流场风速进行测量。皮托管固定于风洞横截面的中心位置,垂直方向上设有10个测量高度,分别与风洞底面相距3,6,11,16,31,61,120,200,350,500 mm。试验过程中保持皮托管固定,通过水平移动沙障来改变水平方向流场测点。对于网拱形沙障,测点包括三部分:沿上风向与沙障前缘相距0.5 H,1 H,2 H,3 H,4 H,5 H,7 H,10 H,15 H

的 9 个前方测点,沿风向与沙障前缘相距 0 H,0.5 H,1 H,1.5 H 的 4 个内部测点,沿风向与沙障后缘相距 0 H,0.5 H,1 H,2 H,3 H,4 H,5 H,7 H,10 H,15 H,20 H 的 11 个后方测点。H 表示沙障高度,为 30 cm,共 24 个风速测点(图 2a)。每个测点的风速数据采集持续时间为 30 s,记录频率为 1 s。



a 单层网拱形沙障　　b 双层网拱形沙障

图 1　单层和双层网拱形沙障

Fig.1　Net-arched sand barriers with single-layer and double-layer structures

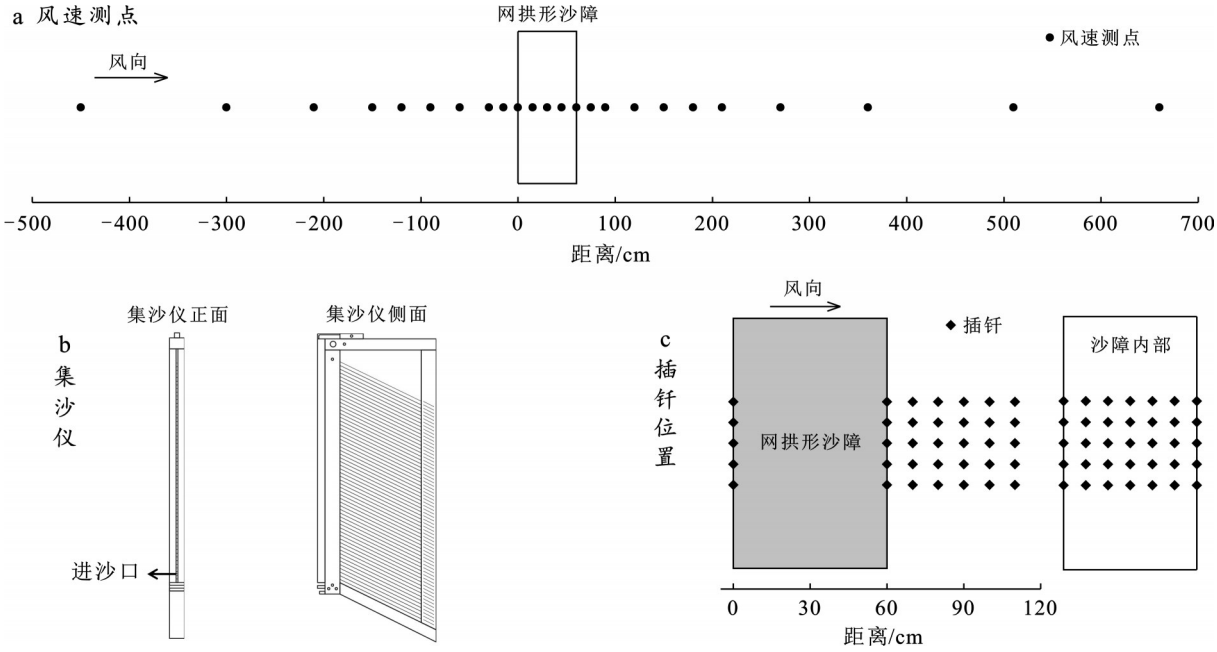


图 2　风速测点、集沙仪和插钎位置

Fig.2　Wind speed measuring points, sand sampler and insertion rod positions

在试验风速为 6,10,14,18 m/s 下,分别计算各测点在每个观测高度的风速加速率 a_{imn},该参数的计算公式为

$$a_{imn}=v_{imn}/u_{in} \tag{1}$$

式中:i 表示风洞试验指示风速(m/s);m 表示布设测点水平相对位置;n 表示皮托管各测点高度(cm);v_{imn} 表示在指示风速为 i 的净风环境下坐标为(m,n)点的平均风速(m/s);u_{in} 表示在无沙障环境下,各高度 n 在 4 种指示风速 i 下的平均风速(m/s)。

防风效能主要用于评价沙障对风速的削减程度,体现防风结构的保护能力,计算公式为

$$E_{imn}=(v_{in}-v_{imn})/v_{in}\times 100\% \tag{2}$$

式中:E_{imn} 表示指示风速 i 下位于水平距离 m 和高度 n 的防风效能,其数值越大表示防风效益越好;v_{in} 表示位于 m=−450 cm 处各高度 n 在指示风速为 i 的净风环境下的平均风速(m/s);v_{imn} 的含义与风速加速率公式中相同。实际应用中,气流带动沙粒 90% 以上发生在距地面 30 cm 以下高度范围内,其中特别集中分布在 0—10 cm 高度内,约占 80%[18]。网拱形沙障高度为 30 cm,为客观反映沙障对地表风沙活动的防护能力,本文选取 20 cm 高度以下核心范围的全部风速对比防风效能。

沙障布设于10 cm厚的沙床表面，在每组试验开始前，均重新添加沙样并刮平表面，确保沙床的厚度、长度、表面形态保持一致。使用直立式集沙仪（图2b）对高度0～60 cm的输沙量进行采集，集沙仪每个集沙口长1 cm，宽0.5 cm，共有60个，布设于沙障中心后方2 m处。试验设置6，10，14，18 m/s共4组风速条件，与其对应的吹蚀时长分别为10，4，2，1 min。同时以无沙障条件作为对照，其吹蚀风速与时间均与设置沙障时保持一致。每次吹蚀结束后，使用千分位天平对各个高度层收集的沙样进行称重。总输沙率（q_t）为不同高度输沙率之和，固沙率（RS）计算公式为

$$RS=(1-q_{tg}/q_{tf})\times 100\% \quad (3)$$

式中：q_{tg}为布设沙障后总输沙率〔g/(cm²·min)〕；q_{tf}为无沙障时总输沙率〔g/(cm²·min)〕。

为量化网拱形沙障周围蚀积的空间分布，采用插钎进行网格化监测。插钎长20 cm，直径0.15 cm，已标记好刻度，插钎之间距离10 cm。在沙障前方、内部及后方均布设插钎（图2c），其中前方布设5根，后方布设30根，内部布设35根，共70根插钎。试验选取6，10，14，18 m/s共4组风速条件，分别对应10，4，2，1 min的吹蚀时长。每完成一个风速条件的吹蚀后，通过插钎刻度读取并记录沙障外部区域的沙面高度变化。待全部4种风速的吹蚀试验结束后，再统一测定沙障内部各插钎的蚀积高度数据。

2 结果与分析

2.1 风速加速率变化特征

不同试验风速下，网拱形沙障周围的风速流场存在相似的变化规律，因此对比18 m/s风速下不同类型网拱形沙障风速加速率差异（图3）。在沙障前，双层沙障较单层对气流有更好的削弱效果，孔径2 mm双层沙障减速效果最好，风速加速率在0.9以下范围可延伸至$m=-200$ cm。在沙障内部，双层沙障风速加速率在0.8以下范围多于单层，孔径2 mm双层沙障风速加速率减弱效果最强，从0.9迅速降到0.5。在沙障后，气流经过沙障减速，风速加速率继续减弱，双层沙障的风速加速率值低的区域多于单层，孔径2 mm双层沙障在$m=70\sim170$ cm范围出现风速加速率小于0.4的区域。

孔径2 mm双层网拱形沙障在不同风速下风速加速率特征如图4所示。风速加速率等值线0.5减速区的水平覆盖范围在风速为6，10，14 m/s下，分别为$m=30\sim520$，$30\sim440$，$30\sim410$ cm，在18 m/s下变为$m=30\sim250$，$250\sim440$ cm两部分，可见随着风速增大，减速区长度逐渐缩短。

2.2 防风效能变化特征

在18 m/s风速下不同类型网拱形沙障20 cm高度下防风效能变化如图5所示。防风效能可分为3部分：在沙障前缘120 cm之前（$m=-450\sim-120$ cm），防风效能在－8.8%～5.5%平稳波动；经过沙障（$m=-120\sim180$ cm），气流受到干扰，防风效能在波动中上升18.8%～42.7%；在沙障后缘120 cm之后（$m=180\sim660$ cm），防风效能变得稳定，在14.5%～48.3%波动。双层沙障防风效能在单层之上，孔径2 mm双层沙障防风效能最好。

图6为不同类型网拱形沙障在20 cm高度下的平均防风效能。除6 m/s风速，其余风速下双层沙障平均防风效能好于单层。孔径8 mm单层沙障防风效能最差，最高仅14.7%；孔径2 mm双层沙障防风效能最好，最低已达45.2%；两者相差25.4%～31.1%。随着风速变大，孔径2 mm双层沙障平均防风效能几乎不变（最大差异为1.6%），其他沙障最大差异在3.8%～20.5%。随着孔径变大，沙障防风效能整体呈现下降趋势。

2.3 风沙流结构特征

在6 m/s起沙风速下，集沙仪未收集到沙粒，高度0～60 cm的输沙率整体为0 g/(cm²·min)。其余风速下无沙障时高度0～60 cm的输沙率随高度的增加而下降（图7）。对试验数据进行非线性回归，发现沙面上方的输沙率变化遵循指数衰减函数：

$$q_z=a+b\times\exp(-z/c) \quad (4)$$

式中：q_z代表高度为z cm处的输沙率〔g/(cm²·min)〕；z代表高度（cm）；a，b，c代表回归系数。表1的回归结果显示，3种风速下拟合优度（R^2）均大于0.99，所有回归关系均具有统计学意义（$p<0.001$）。

表1 无沙障时输沙率拟合结果

Table 1 Fitting results of sediment flux density without sand barrier

U/(m·s⁻¹)	参数			拟合优度(R^2)	显著性p
	a	b	c		
10	0.002	2.156	2.512	0.990	<0.001
14	0.064	14.941	2.979	0.992	<0.001
18	0.077	26.582	5.085	0.991	<0.001

10 m/s风速下，在网拱形沙障作用下，集沙仪收集的数据过少，因此未对该风速下输沙率分布进行分析。18 m/s风速下，孔径为2 mm的双层网拱形沙障的输沙率分布分为两部分：沙障高度以下的输沙率分布遵循指数下降趋势，沙障高度以上的输沙率分布遵循指数上升趋势，其余情况下输沙率分布遵循指数衰减规律（图8），所有拟合方程与公式（4）相同。表2显示

了回归结果。所有回归的拟合优度(R^2)均大于0.90,且所有回归的关系均具有统计显著性($p<0.001$)。

表3为不同风速下网拱形沙障的固沙率(RS)。网拱形沙障在不同孔径中,2 mm的平均RS值最大。所有网拱形沙障中2 mm孔径双层规格的RS值最大,在10,14,18 m/s的风速下,其RS值分别为99.9%,96.6%和88.9%。随着孔径变大,沙障固沙率整体呈现下降趋势。

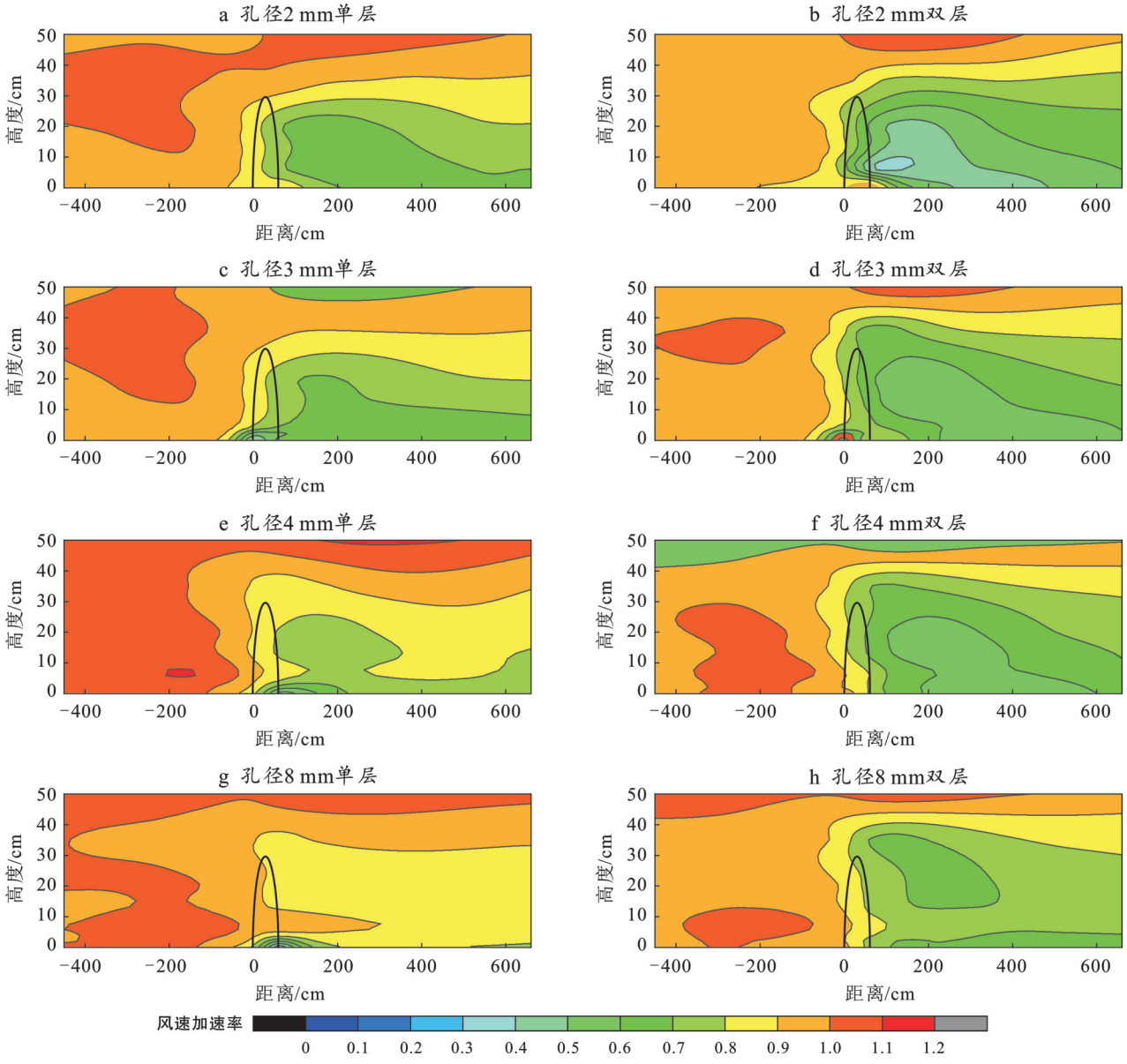


图3　不同类型网拱形沙障风速加速率分布

Fig.3　Distribution of wind speed acceleration rate around different types of net-arched sand barriers

2.4　蚀积结构特征

在6 m/s的起沙风速下,沙障周围并未出现蚀积状况。其余风速下,网拱形沙障障前积沙高度在0~0.3 cm。风速18 m/s下不同类型网拱形沙障障后积沙差异显著(图9)。孔径4,8 mm沙障积沙效果较差,高度仅在−0.3~0.3 cm;而孔径为2和3 mm的沙障积沙主要集中于沙障后10~30 cm。不同孔径中2 mm沙障积沙效果最好。

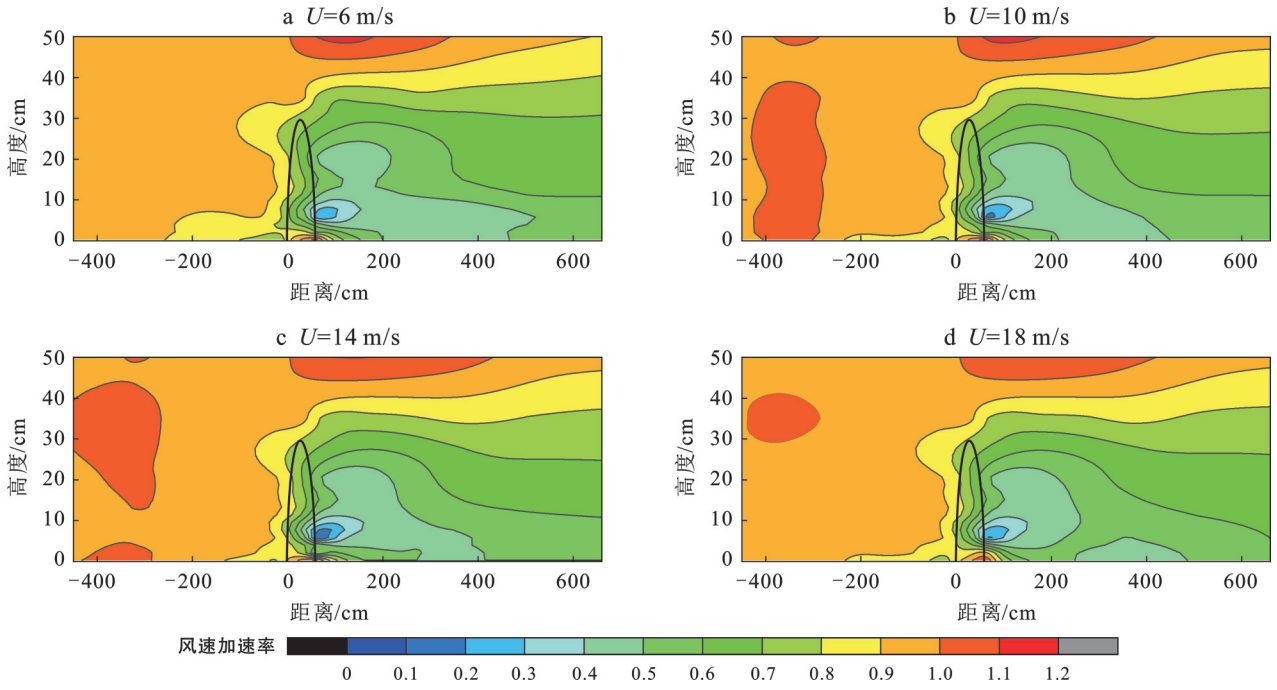
对不同类型网拱形沙障,障内积沙展现出不同状态(图10)。孔径4,8 mm沙障积沙效果较差,高度仅在−0.1~0.3 cm;孔径3 mm沙障积沙集中于障内20~50 cm;孔径2 mm沙障障内积沙较其他分布更加均匀,其中单层最高达1.7 cm,双层最高达1.4 cm。

3　讨　论

3.1　网拱形沙障作用下防风效益差异

传统的直立式网状沙障容易在前端底部出现风力集中现象[19],产生加速区[20],长时间吹蚀便会导致

掏蚀，影响沙障使用寿命。而网拱形沙障相较于直立式网状沙障，对气流的分散效果更好，引导气流向斜上方移动，可以形成范围更大、更完整的减速区。双层结构基于风洞内多层阻尼网的整流设计原理[16]，相较于单层结构，能更有效地将湍流整流为平流，对气流的削减效果更为显著，有效降低风速，减少风蚀的可能性。试验结果也表明双层沙障在障后能够维持较低的风速，可为植被恢复和沙地固定提供有利的环境[21]。孔径大小显著影响气流减速效果[22]，孔径越小，透风度也越低，正如试验中 2 mm 小孔径沙障展现出最好的气流减速效果。试验的网拱形沙障中孔径 2 mm 双层结构的风速削减效果最好，但随着风速增大，减速区长度逐渐缩短，沙障防风效果具有一定的限值[23]。



注：U 为试验风速。下同。

图 4 不同风速下网拱形沙障风速加速率

Fig.4 Wind speed acceleration rate around net-arched sand barriers under different wind speeds

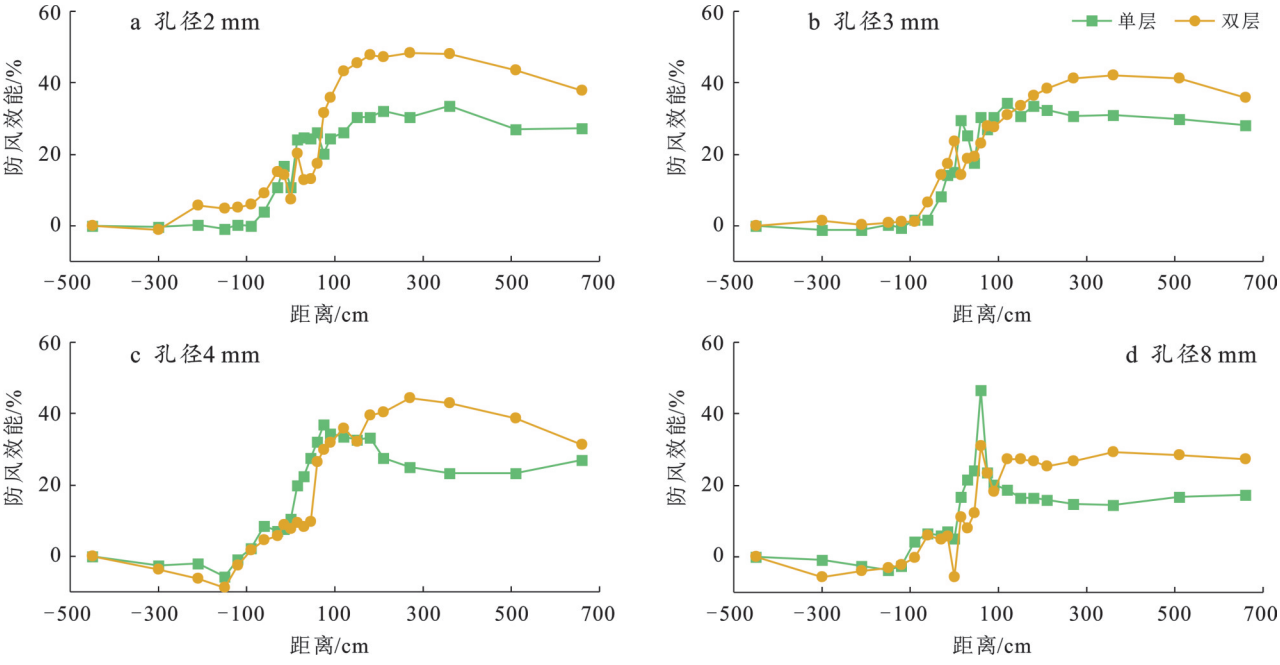


图 5 风速 18 m/s 下不同类型网拱形沙障防风效能

Fig.5 Windbreak efficiency of different types of net-arched sand barriers at a wind speed of 18 m/s

在 18 m/s 大风速下,不同类型网拱形沙障结构整体上对气流的干扰效果一致,可分为 3 部分,在不同区域对气流的调控作用有所不同[24],前方和内部区域主要通过干扰气流来降低风速,而后方区域则通过维持较低的风速来实现稳定的防风效果。双排尼龙阻沙网-草方格联合沙障随着风速增大防风效能持续下降 3.6%～10.0%[25],而孔径 2 mm 双层网拱形沙障的整流效果使得气流更加稳定,在不同风速下具有较高的稳定性和适应性,防风效能仅变化 1.6%,能够有效应对不同强度的风沙环境[26]。

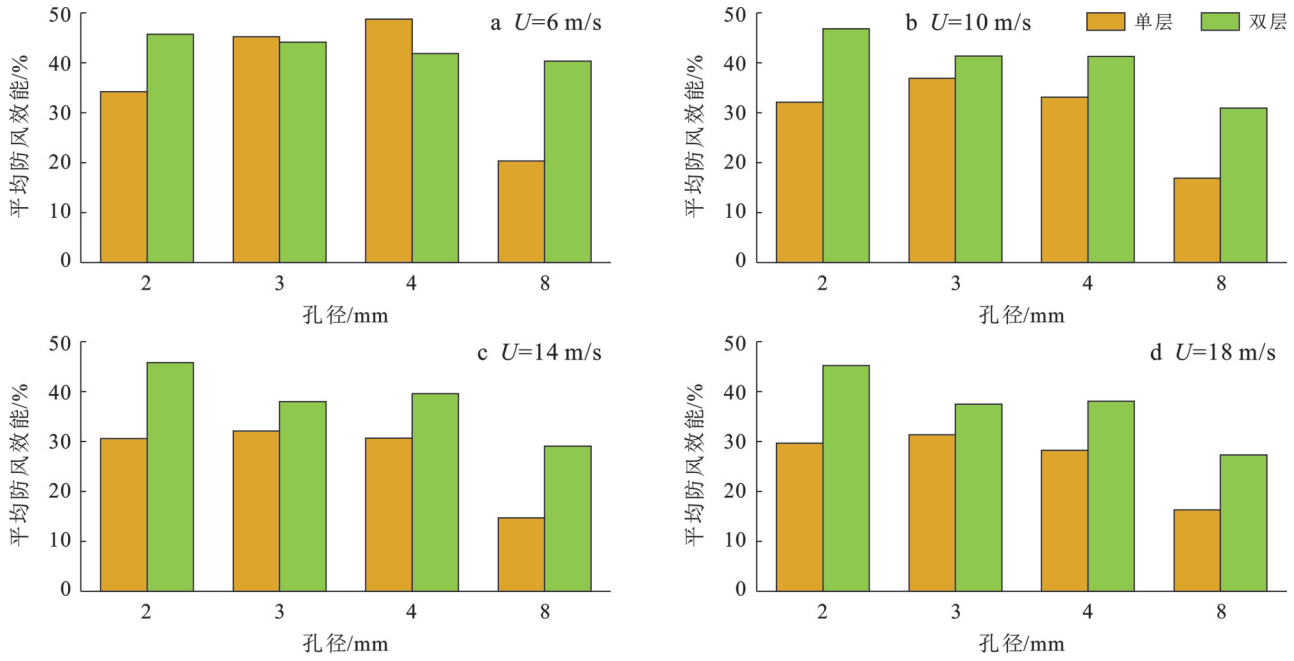


图 6　不同类型网拱形沙障平均防风效能

Fig.6　Average windbreak efficiency of different types of net-arched sand barriers

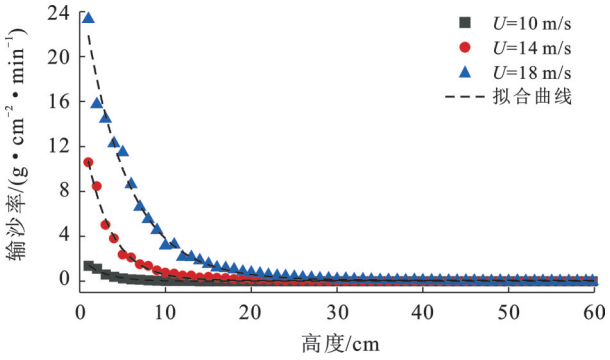


图 7　无沙障时输沙率分布

Fig.7　Distribution of sediment flux density without sand barrier

3.2　网拱形沙障对输沙率分布影响

在 10 m/s 较低风速下,网拱形沙障能够有效降低风沙流动能,使沙粒停留在沙面,显著降低输沙率。而在 18 m/s 较大风速下,孔径为 2 mm 的双层网拱形沙障透风度较低,风沙流穿过沙障受到限制,受到挤压向上喷射,在沙障高度以上通过,并且沙障材质较硬,沙粒与沙障会产生碰撞导致沙粒被反弹回空中,使得输沙率在沙障高度以上出现上升趋势[27]。

在不同孔径的网拱形沙障中,较小的孔径(2 mm)能够更有效地阻挡风沙流,截留沙粒,从而提高沙障的固沙效果。2 mm 孔径双层规格的网盾状沙障固沙率在 67.8% 以上[14],而相同规格网拱形沙障固沙率在 88.9% 以上,展现出该结构沙障在不同风速下均能保持较高的固沙效率,尤其是在较低风速下,固沙效果能达到 99.9%,应用价值巨大。

3.3　网拱形沙障对蚀积状况影响

当沙障孔径过大(4 mm 和 8 mm),透风度较大,对气流的减速能力较弱,穿过的气流仍保持较高的输沙能力,导致沙粒难以在沙障周围沉降。当孔径减小至 3 mm 时,气流与沙障相互作用变为“穿流与绕流混合”模式,障内积沙集中于 20～50 cm,虽然沙障产生一定的拦截效果,但障内积沙不均匀,不利于沙障的长期稳定性。当孔径进一步减小至 2 mm 时,气流的通过方式发生改变,穿过的气流由集中的射流束破碎为分散的小尺度湍流,破碎后的气流方向趋于随机化,破坏射流原本的定向输沙能力,沙粒在重力作用下在沙障后方 10～30 cm 集中沉降。而孔径 2 mm 的双层沙障将气流先破碎后整流,使得障内气流被平稳减弱,障内积沙分布更加均匀,形成较厚的积沙层。这种均匀的积沙分布有助于稳定沙障结构,减少风蚀对沙障的破坏[28]。

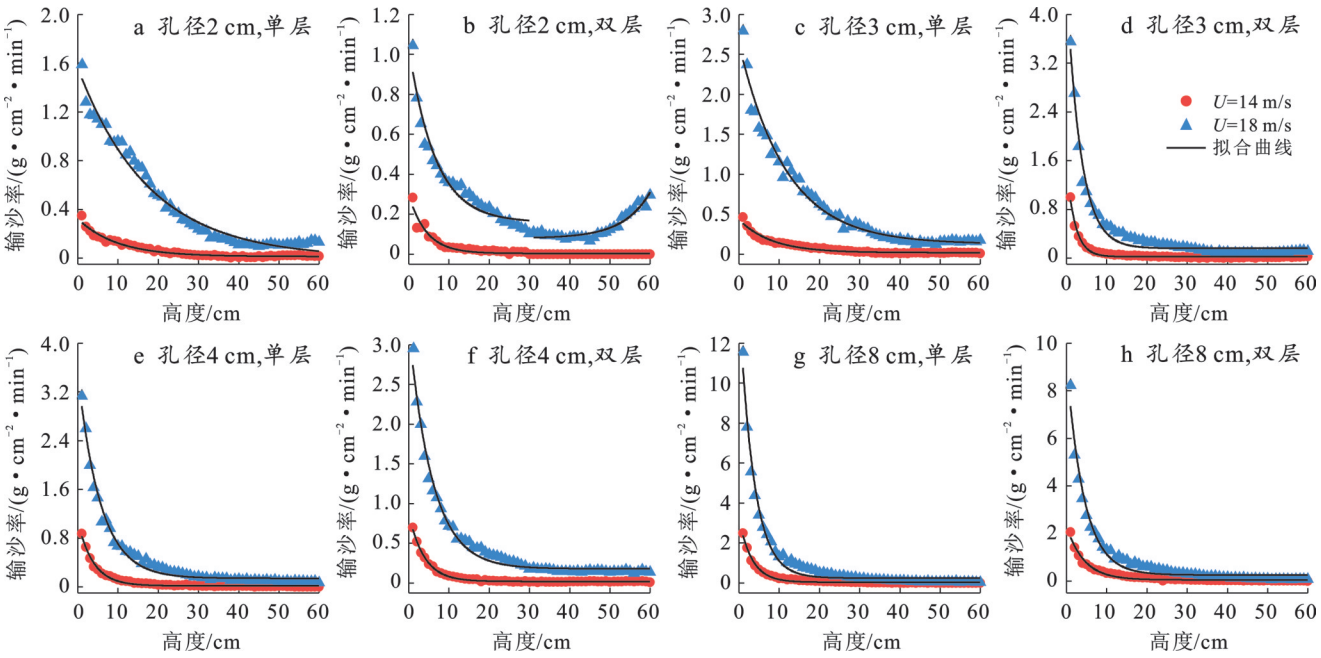


图 8 不同类型网拱形沙障输沙率分布

Fig.8 Distribution of sediment flux density for different types of net-arched sand barriers

表 2 不同类型网拱形沙障输沙率拟合结果

Table 2 Fitting results of sediment flux density for different types of net-arched sand barriers

孔径/mm	U/(m·s^{-1})	单层					双层				
		a	b	c	R^2	p	a	b	c	R^2	p
2	14	0.014	0.310	9.661	0.967	<0.001	0.004	0.294	4.39	0.931	<0.001
	18 (0～30 cm)	0.003	1.559	17.808	0.978	<0.001	0.159	0.878	6.600	0.950	<0.001
	18 (30～60 cm)						0.080	0.001	−6.724	0.903	<0.001
3	14	0.020	0.414	8.107	0.960	<0.001	0.023	1.499	2.104	0.981	<0.001
	18	0.129	2.509	11.723	0.979	<0.001	0.161	4.361	3.479	0.975	<0.001
4	14	0.018	1.065	3.810	0.986	<0.001	0.020	0.856	3.801	0.996	<0.001
	18	0.141	3.381	5.587	0.985	<0.001	0.180	3.047	5.851	0.986	<0.001
8	14	0.038	3.221	3.176	0.987	<0.001	0.052	2.270	4.323	0.971	<0.001
	18	0.246	13.895	3.594	0.981	<0.001	0.258	8.961	4.299	0.972	<0.001

表 3 不同类型网拱形沙障固沙率

Table 3 Sand-fixing efficiency of different types of net-arched sand barriers

孔径/mm	层数	U/(m·s^{-1})			平均
		10	14	18	
2	单层	97.5	91.2	79.3	89.3
	双层	99.9	96.6	88.9	95.1
3	单层	98.5	89.5	71.9	86.6
	双层	96.3	90.7	82.1	89.7
4	单层	92.5	88.8	79.7	87.0
	双层	92.7	90.1	77.7	86.8
8	单层	74.5	73.3	54.3	67.4
	双层	85.3	71.3	60.9	72.5

3.4 网拱形沙障的实际应用展望

网拱形沙障已经实现机械化生产,运输时仅需将沙障多层相扣叠加,大幅节省空间,到达风沙防治区域,将沙障按一定间距网格化布设即可。金属网材质保证更长的使用年限,可移动性使其免受沙埋影响,还可回收进行灵活布设。“沙戈荒”地区自然环境严酷、风沙活动强烈,严重的风沙灾害已成为光伏电站建设亟待解决的工程技术问题。外围阻沙措施目前多为防护林或阻沙栅栏。然而为追求光伏电站效益最大化,光伏场地外围剩余面积过少,难以建立防护林体系。固定高度阻沙栅栏存在不能提升的限制,容易产生沙埋,会极大缩短使用年限。而新型提升式可移动网拱形沙障解决了以上问题,防风固沙效果出色,施工便捷,适宜在“沙戈荒”光伏基地大面积推广应用。

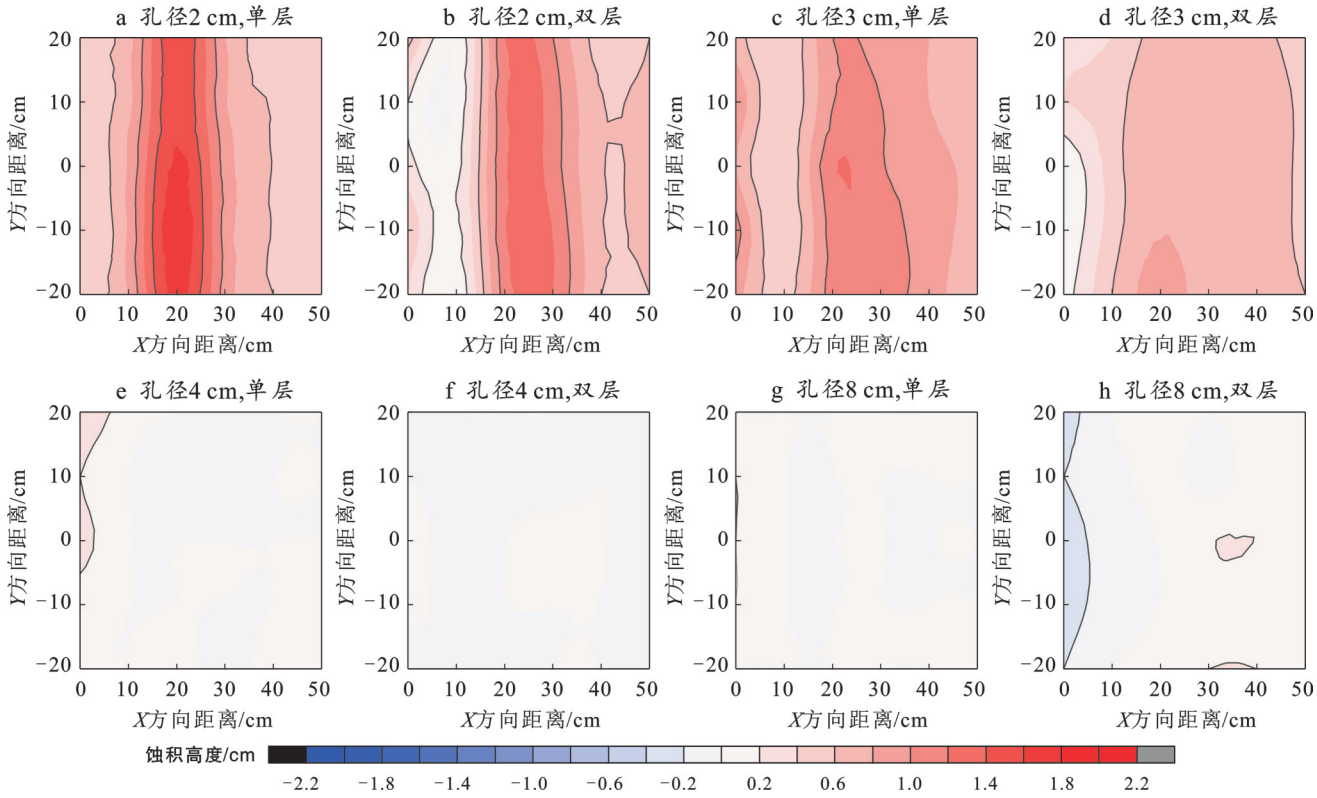


图 9　不同类型网拱形沙障障后蚀积分布

Fig.9　Distribution of erosion and deposition behind different types of net-arched sand barriers

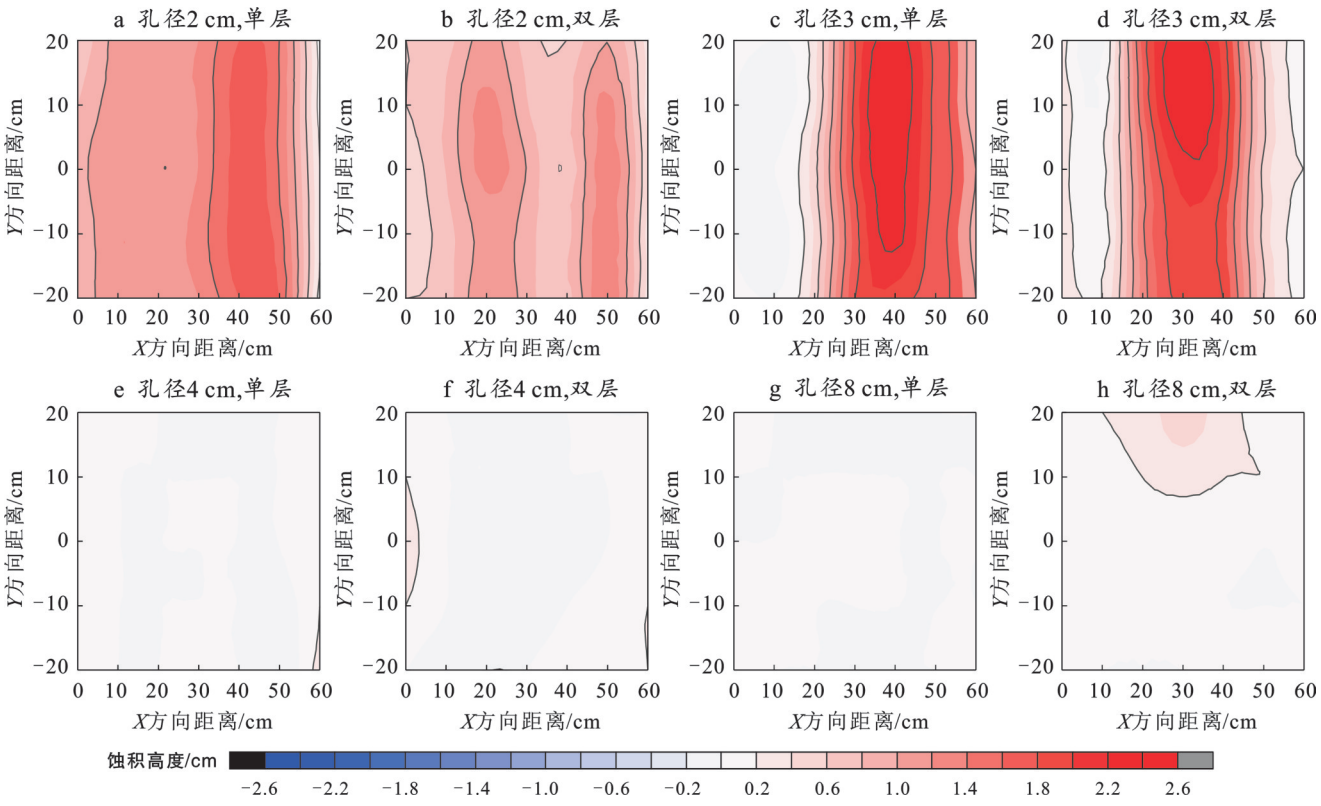


图 10　不同类型网拱形沙障障内蚀积分布

Fig.10　Distribution of erosion and deposition inside different types of net-arched sand barriers

移动式网拱形沙障不仅适用于“沙戈荒”地区的光伏电站、铁路、公路等,还可应用于风速大,湍流强的沙质海岸与岛礁,通过季节性布设避开海龟产卵期,在防风固沙的同时减少对海洋生物正常生长发育

与繁殖的干扰。网拱形沙障无论是在防风固沙方面，还是在生产运输施工方面均展现出广泛的应用前景。

4 结 论

（1）双层网拱形沙障对气流产生分散与整流作用，防风效能呈现“平稳—上升—平稳”的3段式结构。其中，孔径2 mm的双层沙障风速调控能力最强，风速加速率在0.9以下范围延伸至$m=-200$ cm处，在不同风速下，该沙障均保持45.2%以上的防风效能，且变化幅度小于1.6%。

（2）2 mm孔径双层网拱形沙障表现出优异的固沙效果。特别是10 m/s风速下，该沙障固沙率达99.9%；而在18 m/s风速下，输沙率分布不同于其他沙障，呈现出沙障高度以下指数下降分布、沙障高度以上指数上升分布规律。

（3）4 mm和8 mm的大孔径网拱形沙障积沙效果较弱，积沙高度低于0.3 cm。而2 mm孔径双层沙障积沙效果最佳，最大积沙高度达1.4 cm，障后积沙主要集中在10～30 cm范围内，且障内积沙分布更均匀。

（4）孔径2 mm双层网拱形沙障在降低风速，减少输沙率和增加积沙方面均表现优异，其防风效能和固沙率在不同风速下均维持高效，生产运输施工便捷，推广与应用价值较大。

参考文献(References)

[1] 邴丹珲，谈嫣蓉，陈文业，等.中国沙障的研究进展与应用综述[J].中国水土保持，2023(7)：37-40.
Bing Danhui, Tan Yanrong, Chen Wenye, et al. Research progress and application of sand barriers in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(7):37-40.

[2] 宋佳璇，蒙仲举，袁立敏，等.沙障材料应用研究进展和展望[J].内蒙古林业科技，2025，51(4)：58-64.
Song Jiaxuan, Meng Zhongju, Yuan Limin, et al. Advances and prospects in the application of sand barrier materials [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2025,51(4):58-64.

[3] 屈建军，凌裕泉.应用风沙工程学：特殊环境风沙灾害防治[M].北京：科学出版社，2024.
Qu Jianjun, Ling Yuquan. Application of Sandstorm Engineering: Prevention and Control of Sandstorm Disaster in Special Environment [M]. Beijing: Science Press, 2024.

[4] 陈舜瑶.沙都散记[M].北京：科学出版社，2022.
Chen Shunyao. Random Notes of the Tengger Desert [M]. Beijing: Science Press, 2022.

[5] 顿耀权，屈建军，康文岩，等.包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述[J].中国沙漠，2021，41(3)：66-74.
Dun Yaoquan, Qu Jianjun, Kang Wenyan, et al. Progress and prospect of research on the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou railway [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3):66-74.

[6] Stone R. Cultural heritage. Shielding a buddhist shrine from the howling desert sands [J]. Science, 2008, 321(5892):1035.

[7] 庞营军，屈建军，谢胜波，等.高立式格状沙障防风效益[J].水土保持通报，2014，34(5)：11-14.
Pang Yingjun, Qu Jianjun, Xie Shengbo, et al. Windproof efficiency of upright checkerboard sand-barriers [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5):11-14.

[8] 倪成君，何海琦，张克存，等.华南沿海风沙危害防护体系及其效益分析[J].中国沙漠，2011，31(5)：1098-1104.
Ni Chengjun, He Haiqi, Zhang Kecun, et al. Windblown sand control system and its benefit on the coast of southern China [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5):1098-1104.

[9] Shi Long, Wang Dongyuan, Cui Kai, et al. Comparative evaluation of concrete sand-control fences used for railway protection in strong wind areas [J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(2):183-198.

[10] 高天笑，王涛，杨文斌，等.低覆盖度羽翼袋沙障防风积沙效应的风洞试验[J].中国沙漠，2019，39(6)：177-183.
Gao Tianxiao, Wang Tao, Yang Wenbin, et al. Wind tunnel experimental study on the effect of wind-proof and sand accumulation in low coverage wingbag sand barrier [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6):177-183.

[11] 张逸君，赵鹏，姜生秀.草方格沙障研究进展[J].防护林科技，2025(6)：71-75.
Zhang Yijun, Zhao Peng, Jiang Shengxiu. Research progress on straw checkerboard sand barriers [J]. Protection Forest Science and Technology, 2025(6):71-75.

[12] 屈建军，王涛，牛清河，等.刷状草方格固沙障机织工艺与防沙效果研究[J].中国科学(技术科学)，2024，54(8)：1601-1610.
Qu Jianjun, Wang Tao, Niu Qinghe, et al. Study on weaving technology and sand control effect of brush straw checkerboard barriers [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(8):1601-1610.

[13] 袁鑫鑫，王海峰，雷加强，等.不同结构尼龙网防风效应的风洞模拟[J].干旱区研究，2017，34(1)：185-190.
Yuan Xinxin, Wang Haifeng, Lei Jiaqiang, et al. Wind tunnel simulation of wind protection effects of nylon nets with different structures [J]. Arid Zone Research,

2017,34(1):185-190.

[14] 屈建军,朱志昊,李启航,等.双层网盾状沙障防风固沙效益的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(3):141-151.
Qu Jianjun, Zhu Zhihao, Li Qihang, et al. Wind tunnel test on windbreak and sand-fixing effect of double-layer net shield sand barrier [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(3):141-151.

[15] 屈建军,宋乃平,杜灵通,等.一种可移动式拱形网笼式阻沙障: CN201921533463.9[P].2020-06-05.
Qu Jianjun, Song Naping, Du Lingtong, et al. A mobile arch-shaped mesh cage-type sand retaining barrier: CN201921533463.9 [P]. 2020-06-05.

[16] 屈建军,王涛,牛清河,等.兰新高铁戈壁特大风区风沙灾害形成机理及防沙技术[J].中国科学(地球科学),2023,53(2):277-286.
Qu Jianjun, Wang Tao, Niu Qinghe, et al. Mechanisms of the formation of wind-blown sand hazards and the sand control measures in Gobi areas under extremely strong winds along the Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(2): 277-286.

[17] 尚小伟,王云正,刘建国,等.横孔与竖孔HDPE板栅栏防风效益对比的风洞模拟[J].水土保持通报,2025,45(4):134-142.
Shang Xiaowei, Wang Yunzheng, Liu Jianguo, et al. Wind tunnel simulation comparing windproof performance of high-density polyethylene board fences with horizontal versus vertical holes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(4):134-142.

[18] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
Wu Zheng. Geomorphology of Wind-drift Sands and Their Controlled Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[19] 孙显科.辩证思维与风沙运动理论体系的创建和应用[M].北京:中国林业出版社,2010.
Sun Xianke. The Creation and Apply of Eolian Sand Movement Theory System in Dialectical Thinking [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.

[20] 邓雅文,俎瑞平,宗玉梅,等.植物纤维网沙障防风效能的风洞试验[J].中国沙漠,2025,45(1):242-248.
Deng Yawen, Zu Ruiping, Zong Yumei, et al. Wind tunnel simulations on windbreak efficiency of sand barriers made of plant fiber nets [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(1):242-248.

[21] 田美荣,田雨欣,杨伟超,等.不同规格芦苇沙障生态保护成效研究[J].环境工程技术学报,2023,13(2):753-759.
Tian Meirong, Tian Yuxin, Yang Weichao, et al. Study on conservation effectiveness of reed sand barrier with different types[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(2):753-759.

[22] Chen Boyu, Cheng Jianjun, Xin Lingui, et al. Effectiveness of hole plate-type sand barriers in reducing aeolian sediment flux: Evaluation of effect of hole size [J]. Aeolian Research, 2019,38:1-12.

[23] 祁延录.南疆戈壁区机械防沙措施阻沙效益的风洞测试研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):892-900.
Qi Yanlu. Protection benefits of mechanical sand control measures in Gobi district,southern Xinjiang [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 892-900.

[24] 李凯崇,谭立海,石龙,等.孔隙率对芦苇沙障风沙防护效果影响分析[J].铁道学报,2022,44(5):166-170.
Li Kaichong, Tan Lihai, Shi Long, et al. Influence of porosity on blown sand protection effect of reed sand barrier [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(5):166-170.

[25] 王茂林,宋玲,刘杰,等.双排尼龙阻沙网-草方格联合沙障防风效应的风洞实验[J].中国沙漠,2024,44(3):9-17.
Wang Maolin, Song Ling, Liu Jie, et al. Wind tunnel experiment on windproof effect of double-row nylon sand-blocking net-grass square combination [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(3):9-17.

[26] Wang Tao, Qu Jianjun, Niu Qinghe. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel[J].Aeolian Research,2020,43: 100575.

[27] 朱志昊,屈建军,赵爱国,等.两种形状镁水泥板沙障防风积沙效益的风洞试验[J].中国沙漠,2024,44(2):1-10.
Zhu Zhihao, Qu Jianjun, Zhao Aiguo, et al. Wind tunnel test on wind-blown sand prevention effects of two kinds of magnesium cement board sand barriers [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(2):1-10.

[28] 张登山,吴汪洋,田丽慧,等.青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J].地理科学,2014,34(5):627-634.
Zhang Dengshan, Wu Wangyang, Tian Lihui, et al. Effects of erosion and deposition and dimensions selection of straw-checkerboard barriers in the desert of Qinghai Lake [J]. Geographical Science, 2014, 34(5): 627-634.